

나노크기 TiO_2 제조 및 광촉매에 의한 페놀 광분해

최상근 · 김동주 · 신상철* · 소명기** · 김교선†

강원대학교 공과대학 화학공학과, **신소재 공학과
(2002년 3월 23일 접수, 2002년 5월 14일 채택)

Preparation of Nano-Size TiO_2 Particles and Photo-Degradation of Phenol by Photocatalysts

Sang-Keun Choi, Dong-Joo Kim, Sang-Cheol Shin*, Myoung-Gi So** and Kyo-Seon Kim†

Department of Chemical Engineering, **Department of Advanced Materials Science Engineering,
Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea
(Received 23 March 2002; accepted 14 May 2002)

요 약

본 연구에서는 확산형 화염 반응기를 사용하여 공정변수 변화에 따라 TiO_2 입자를 제조하였고 제조된 TiO_2 입자들의 물성을 분석하였다. 또한 slurry 형 광촉매 반응기에서 제조된 TiO_2 광촉매를 사용하여 페놀의 광분해를 분석하였다. 연료/산소의 공급 유량비가 증가할수록, 초기 TiCl_4 공급 농도가 증가할수록, 전체 기체 유량이 감소할수록 TiO_2 입자의 평균 크기는 증가한다. TiO_2 입자의 비표면적은 초기 TiCl_4 공급 농도가 증가함에 따라 감소한다. TiO_2 광촉매의 평균 입자 크기가 감소할수록, O_2 공급 유량이 증가할수록, 페놀의 광분해 속도는 증가한다. TiO_2 입자의 anatase 조성의 양이 많을수록 페놀의 광분해 속도는 높게 나타난다.

Abstract – The nano-sized TiO_2 particles by the diffusion flame reactor were prepared and the effects of several process variables on the properties of TiO_2 particles were investigated. The photo-degradation of phenol was also analyzed with the prepared TiO_2 particles in the slurry type photocatalytic reactor. As the fuel/ O_2 input ratio or inlet TiCl_4 concentration increases or as the total gas flow rate decreases, the TiO_2 particles size increases. The specific surface area of TiO_2 particles decreases as the inlet TiCl_4 concentration increases. As the TiO_2 particle size decreases or as the O_2 flow rate increases, the photo-degradation efficiency of phenol increases by the faster photo-degradation rate. The larger the amount of anatase phase in TiO_2 particles, the higher the photo-degradation efficiency of phenol is.

Key words: Nono-Sized TiO_2 Particles, Photo-Degradation, Photocatalysts, Diffusion Flame Reactor

1. 서 론

오늘날 급속한 산업 발달로 인해 수질오염, 대기오염 및 토양오염 등과 같은 환경오염문제가 심각해지고 있다. 따라서 선진국에서는 법률적으로 환경오염원에 대한 규제가 강화되고 있다. 수질오염의 감소를 위한 기존의 폐수처리 방법은 표준 활성오니 방식, 장기폭기(활성)방식, 회분식 활성오니 방식 등과 같은 생물학적 처리방법과 응집침전법, 부상분리법(가압부상), 활성탄을 이용한 흡착법, 기포제거방법 등과 같은 물리 화학적 처리방법으로 나누어진다. 기존의 폐수처리 방법의 대부분은 액체상태의 오염물질을 단순히 고체나 기체상태로 변화시킬 뿐 완전히 분해하지 못하여 2차 공정 및 다단계 공정이 필요하다는 단점이 있다[1-5]. 따라서, 기존의 폐수 처리 방법들이 갖고 있는 단점들을 극복하기 위해 새로운 폐수처리기술에 대한 연구 및 개발이 요구되고 있다.

광촉매 반응을 이용한 폐수처리 방법은 2차 부산물의 발생이 없고 상온 및 상압에서 사용이 가능하다는 장점을 가지고 있어 포화 및 불포화 지방족 탄화수소, 알코올, 카르복실산, 페놀, 계면활성제, 제초제, 살충제, 내성 유기물 및 염료 등과 같은 화합물의 분해에 활용하려는 연구가 최근에 많이 수행되고 있다. 또한 광촉매를 이용한 미생물의 처리(germs, virus, bacteria, cancer), self-cleaner, 탈취제의 분해 등에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다[6-11]. TiO_2 입자는 비독성, 비용해성 입자이며, band-gap 에너지가 약 3.2 eV로 화학적으로 매우 안정하고 자연광속의 자외선으로도 산화반응이 가능하여 광촉매로서 활용되고 있다. TiO_2 입자 제조 방법에는 기상법과 액상법이 있으며, 기상법으로 입자를 제조할 경우 액상법에 비해 입자의 크기 조절이 쉽고 제조 공정이 단순하다.

본 연구에서는 기상법 중 확산형 화염 반응기를 사용하여 공정변수 변화에 따라 나노크기 TiO_2 입자를 제조하였으며 공정변수 변화가 TiO_2 입자의 물성에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 제조한 TiO_2 광촉매를 사용하여 페놀의 광분해 실험을 하였으며 공정변수를 변화시켜 가며 페

†To whom correspondence should be addressed.

E-mail: kkyoseon@kangwon.ac.kr

*Current address: (주)녹십자

놀의 광분해 효율을 체계적으로 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

2-1. TiO₂ 입자 제조 장치

나노크기 TiO₂ 입자를 제조하기 위해 사용한 실험장치의 개략도는 Fig. 1과 같다. 확산화염 반응기는 직경이 2.5 cm로 5개의 동심원으로 구성되어 있다. 확산화염 반응기를 이용한 TiO₂ 입자 제조를 위해 도시가스(프로판 59.25%, 질소 30.45%, 산소 8.09%, 부탄 1.47%)를 연료가스로 사용하였다. 본 연구에서 사용한 모든 기체(도시가스, 산소, 질소)는 silica-gel에 통과시켜 수분을 제거한 후 유량계를 사용하여 반응기에 정량 공급되도록 하였다. 액상의 TiCl₄를 반응기로 공급하기 위해 N₂ 기체를 TiCl₄ bubbler에 통과시켜 일정량의 TiCl₄가 N₂ 기체에 포화된 후 확산 화염 반응기의 첫 번째 동심원에 공급되도록 하였다. 불꽃 모양과 유체의 흐름을 plug 흐름으로 안정화시키기 위해 네 번째 동심원 입구를 통해 sheath 기체(N₂)를 주입하였다.

확산 화염 반응기의 화염온도는 R-type 열전대와 optical pyrometer를 이용하여 측정하였다. 반응기에 의해 제조된 TiO₂ 입자는 pyrex 관을 통과하면서 충돌에 의해 성장하게 되며 성장한 TiO₂ 입자를 열영동 현상을 이용한 collector를 사용하여 포집하였다. 제조된 TiO₂ 입자의 물성은 BET(Micromeritics, ASAP2000), XRD(Bruker, D5005), 광산란 방법을 이용한 particle sizer(Brookhaven, 90Plus) 등을 이용하여 측정하였다.

2-2. 폐놀 광분해 실험장치

본 연구에서 폐놀의 광분해 실험을 위해 사용한 반응기의 개략도는 Fig. 2에 나타났다. 광분해 반응기는 직경이 6.5 cm인 외부 튜브, 4 cm인 내부 튜브, 자기 교반기로 구성되어 있고 외·내부 튜브의 재질은 pyrex 이다. 광분해 실험을 위해 UV lamp(15 W, 365 nm, 1,100 μW/cm²)를 광원으로 사용하였고 내부 튜브 안쪽에 UV lamp를 설치하여 자외선이

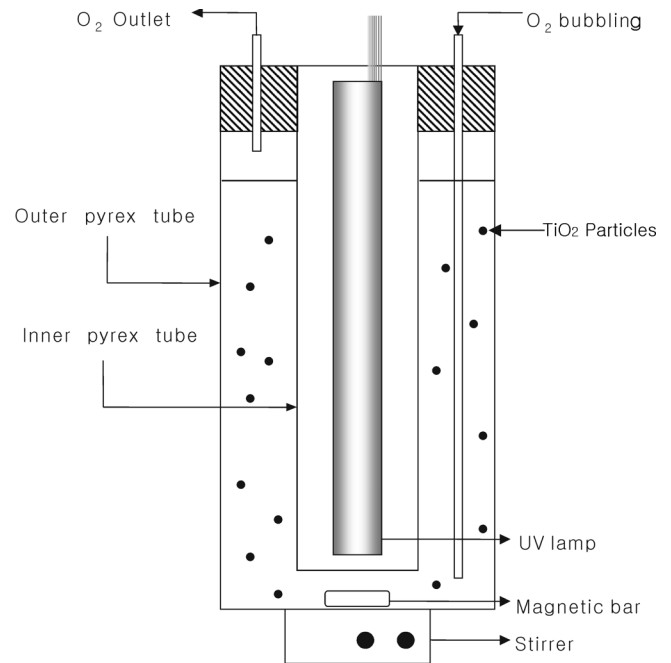


Fig. 2. Schematic of experimental setup for photo-degradation.

반응기 안쪽으로부터 전체에 투사되도록 하였다. O₂ 기체는 MFC를 사용하여 반응기 내로 정량 공급하였으며, 반응기 내에서 O₂를 고르게 분산시키기 위해 자기 교반기를 사용하였다. 폐놀의 농도 변화는 UV/Vis (HP 89513A) 분광 분석기를 사용하여 시간에 따라 측정하였다.

3. 실험 결과

3-1. 확산화염 반응기를 이용한 나노사이즈 TiO₂ 광촉매 제조

공정변수로서 연료/산소 공급 유량비(R_{fuel/O_2}), 초기 TiCl₄ 공급 농도($C_{TiCl_4,0}$), 전체 기체 유량(Q)을 변화시켜 가며 TiO₂ 입자를 제조하였고 공정변수 변화에 따라 제조된 TiO₂ 입자들의 물성을 각각 분석하였다. 공정변수 변화에 대한 기준 조건으로 R_{fuel/O_2} , $C_{TiCl_4,0}$, Q는 0.2, 0.3 mol%, 2,000 ml/min을 각각 사용하였다.

3-1-1. 확산 화염 반응기의 화염특성

Fig. 3은 연료와 산소의 공급 방법에 따른 확산 화염의 형태를 디지털 카메라로 이미지화한 것이다. Fig. 3에서 (a)와 (c)는 ordinary diffusion flame 반응기로서 산소를 세 번째 동심원에 공급하고, 첫 번째 동심원과 두 번째 동심원에 도시가스를 각각 공급하였을 때 확산 화염의 형태를 각각 보여준다. Ordinary diffusion flame 반응기에서는 도시가스보다 빠른 확산 속도를 가지는 산소가 반응기 중심 쪽으로 확산하여 연소 반응이 일어나므로 화염의 모양이 불룩한 형태를 보이고 있다. Fig. 3에서 (b)와 (d)는 inverted diffusion flame 반응기로서 도시가스를 세 번째 동심원에 공급하고 첫 번째 동심원과 두 번째 동심원에 산소를 공급하였을 때의 확산 화염의 형태를 각각 나타낸다. inverted diffusion flame 반응기에서는 산소가 반응기 바깥쪽으로 확산하여 연소반응이 일어나므로 화염의 모양이 ring 형태를 보이고 있다. Fig. 3에서 (b)의 경우가 (d)의 경우보다 산소가 연료와의 연소반응을 위해 확산하는 시간이 더 오래 걸림으로 화염의 높이가 높게 나타나고 있다. Fig. 3에서 (a), (b), (c)의 확산 화염 반응기에서 TiO₂ 입자를 각각 제조하였을 경우 시간이 경과함에 따라 TiO₂ 입자가 버너의 팁 부분에 부착되어 버너의 일부가 막히는 현상이 나타나 화염 모양이 변형되었다. 따라서 본 연구에서는 TiO₂ 입자 제조 실험시 시간경과에 따라 화염 모양의 변형이 없고

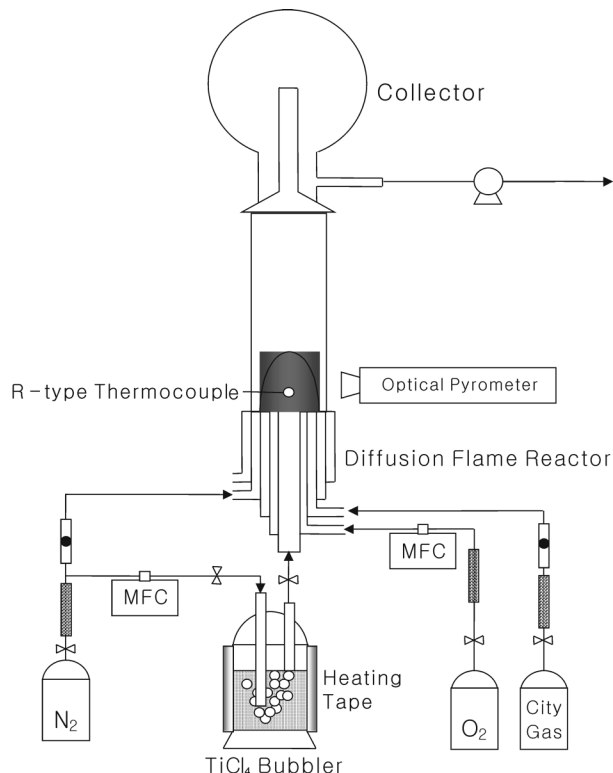


Fig. 1. Schematic of experimental setup to prepare nano-sized TiO₂ particles.

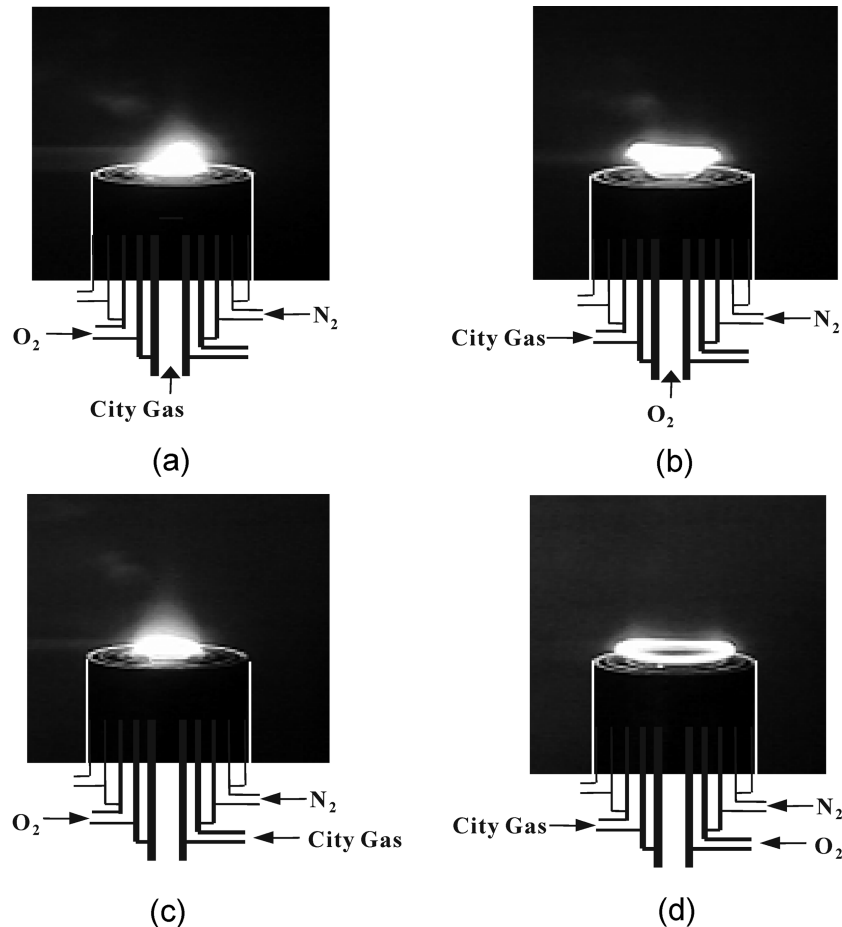


Fig. 3. Photographs of diffusion flame.

버너 출구 부분의 막힘 현상이 나타나지 않는 Fig. 3(d)의 화염 반응기를 이용하여 TiO₂ 미립자를 제조하였다.

본 연구에서 사용한 inverted diffusion flame 반응기의 화염내 온도 분포는 연료/산소 공급 유량비가 0.2와 0.25일 때 Fig. 4와 Fig. 5에 각각 나타났다. Fig. 4에서 버너 출구로부터의 축 거리(z)가 5-20 mm인 경우 확산 화염 반응기의 반경방향(r)으로 약 6 mm 부근에서 연료와 산소의 연소반응이 일어나므로 이 부근에서 화염의 온도가 높게 나타나고 있다. 연소 반응이 종결된 후 z 가 90-120 mm로 증가함에 따라 주위로의 열전달에 의한 열손실이 증가하게 되어 기체온도가 감소하고 있으며 반응기 중앙부의 온도가 바깥쪽보다 높게 나타나고 있다. Fig. 5에서도 z 가 5-20 mm일 때 r 이 약 6 mm에서 화염의 온도가 높게 나타나고 있으며 z 가 90 mm이상부터 반응기 바깥쪽으로의 열손실에 의해 반응기 중앙부의 온도가 바깥쪽보다 높게 나타나고 있다. Fig. 4와 Fig. 5를 비교할 때 연료/산소의 공급 유량비가 0.2-0.25로 증가함에 따라 연소반응에 의한 발열량의 증가로 축거리(z)가 5-20 mm인 경우, 반경방향으로 약 6 mm 부근에서 화염의 최대온도는 약 1,242-1,500 K로 증가하고 있다.

3-1-2. 확산화염 반응기로 제조된 나노 사이즈 TiO₂ 광촉매의 입자특성

Fig. 6은 연료/산소의 공급 유량비 변화에 따라 제조된 TiO₂ 입자들의 입도분포를 particle sizer로 측정 한 결과이다. 연료/산소의 공급 유량비가 0.2에서 0.3으로 증가함에 따라 화염온도의 증가로 반응기 내 TiO₂ 입자는 빨리 생성되고 충돌에 의해 빠르게 성장하므로 TiO₂의 평균 입자크기가 106.7 nm에서 134.8 nm로 증가하고 있다. Fig. 7에서는 초기 TiCl₄ 농도변화에 따른 TiO₂ 입자들의 입도분포를 particle sizer로 측정하여 나타났다. 초기 TiCl₄ 농도가 0.3에서 0.9 mol%로 증가함에 따라

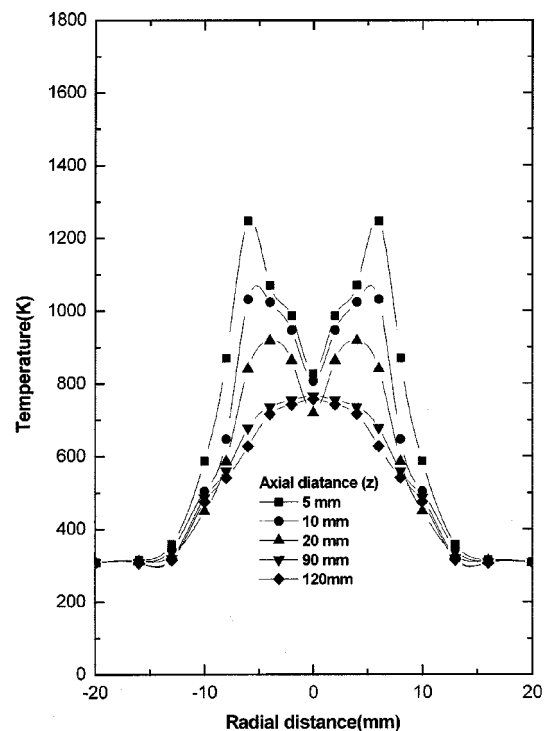


Fig. 4. Temperature profiles in the flame reactor for various axial distances($R_{fuel/O_2}=0.2$, $Q=1,500$ ml/min).

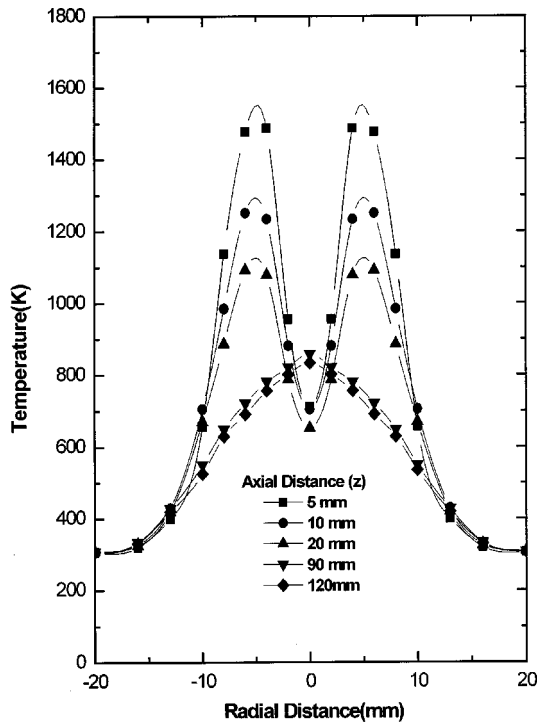


Fig. 5. Temperature profiles in the flame reactor for various axial distances ($R_{fuel/O_2}=0.25$, $Q=1,500$ ml/min).

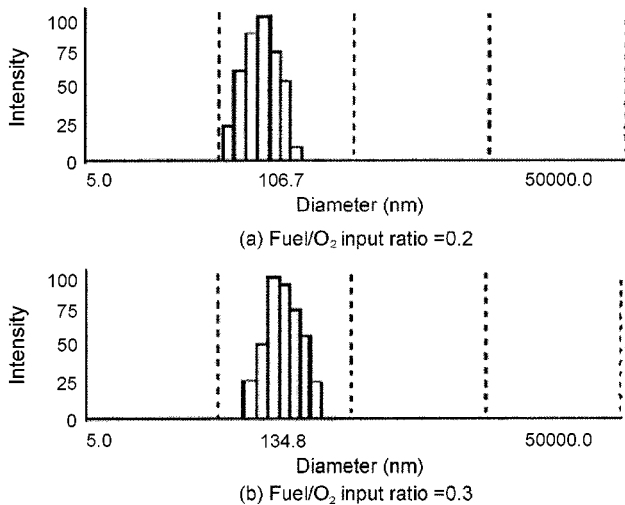


Fig. 6. Particle size distribution prepared by inverted diffusion flame reactor for various fuel/ O_2 input ratios ($C_{TiCl_4}=0.3$ mol%, $Q=1,000$ ml/min).

제조된 TiO₂ 입자의 농도는 증가하므로 입자 충돌에 의한 성장 속도가 증가하여 평균 입자 크기가 106.5 nm에서 140.8 nm로 빠르게 성장한 것을 보여주고 있다. Table 1에 공정변수에 따라 제조된 TiO₂ 입자들의 평균 크기를 나타냈으며 연료/산소의 공급 유량비가 증가하거나 초기 TiCl₄ 농도가 증가함에 따라 입자 충돌 속도의 증가로 TiO₂ 입자의 평균 입자 크기는 증가하고 있다. 전체 기체유량이 2,000 ml/min에서 1,000 ml/min로 감소함에 따라 입자들의 반응기 내 체류시간이 증가하여 더 오랫동안 입자 충돌을 하게 되므로 TiO₂ 입자의 크기는 108.9 nm에서 139.2 nm로 증가하고 있다. 제조된 TiO₂ 입자의 비표면적을 측정한 결과 초기 TiCl₄ 공급 농도가 0.3, 0.6, 0.9 mol%로 증가함에 따라 평균 입자 크기가 증가하므로 비표면적이 149.1, 131.8, 123.4 m²/g로 감소하였다.

Fig. 8에는 전체기체 유량 변화에 따른 TiO₂ 입자들의 XRD 패턴을 나

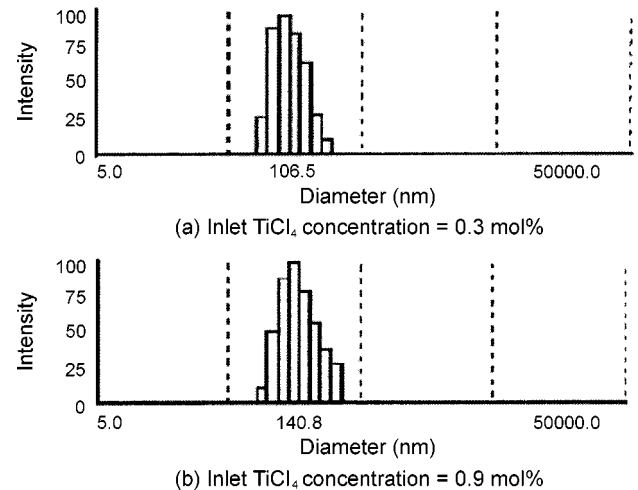


Fig. 7. Particle size distribution prepared by inverted diffusion flame reactor for various inlet TiCl₄ concentrations ($R_{fuel/O_2}=0.2$, $Q=1,000$ ml/min).

Table 1. Average particle sizes for various experimental conditions

Experimental conditions		Average particle size
Ratio of Fuel/ O_2	0.2	106.7 nm
	0.25	122.2 nm
	0.3	134.8 nm
Inlet TiCl ₄ concentration	0.3 mol%	106.5 nm
	0.6 mol%	122.2 nm
	0.9 mol%	140.8 nm
Total gas flow rate	2,000 ml/min	108.9 nm
	1,500 ml/min	122.2 nm
	1,000 ml/min	139.2 nm

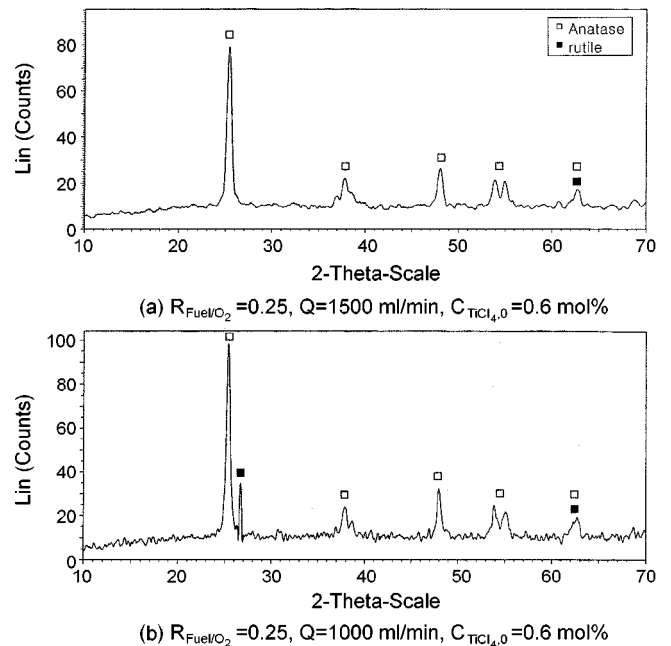


Fig. 8. XRD patterns of TiO₂ particles prepared by inverted diffusion flame reactor for various total gas flow rates.

타냈다. 본 연구에서 제조된 TiO₂ 입자의 anatase와 rutile의 조성비는 Degussa P25 제품을 기준으로 하여 상대적으로 계산하였다. 전체기체 유량을 1,500 ml/min으로 하였을 때 대부분이 anatase인 TiO₂ 입자가 제

조되었고(Fig. 8(a)) 전체기체 유량이 1,000 ml/min일 때는 TiO_2 입자가 고온의 화염에 채류하는 시간이 증가하여 rutile의 함량이 35%인 TiO_2 입자가 제조되었다(Fig. 8(b)).

3-2. TiO_2 광촉매를 이용한 페놀의 광분해

광분해 실험에서 공정변수가 광촉매 반응에 미치는 영향을 분석하기 위해 공정 변수로서 TiO_2 촉매량(A_{TiO_2}), 초기 페놀 농도($C_{\text{Phenol},0}$), O_2 공급 유량(Q_{O_2}), TiO_2 입자의 평균 크기(d_{TiO_2}), rutile/anatase 조성비 등을 변화시켰다. 공정변수에 대한 기준 조건으로 A_{TiO_2} , $C_{\text{Phenol},0}$, Q_{O_2} 은 0.3 g/l, 300 ppm, 50 ml/min를, 광촉매로는 평균 입자 크기가 104.1 nm 이고 anatase가 대부분인 TiO_2 입자를 각각 사용하였다.

3-2-1. TiO_2 촉매량에 따른 페놀의 광분해 영향

Fig. 9에서는 페놀의 농도가 300 ppm일 때 TiO_2 광촉매의 주입량에 따른 페놀의 농도 변화를 시간에 따라 나타냈다. 광분해 반응시간(t)이 증가함에 따라 광분해 반응에 의해 페놀의 농도가 감소하고 있으며 광촉매량이 증가함에 따라 페놀의 광분해 속도가 증가하여 페놀 농도가 빠르게 감소하고 있다. 하지만 광촉매량이 0.3 g/l 이상부터는 광촉매량이 증가함에 따라 페놀의 농도 감소는 거의 관찰되지 않았으므로 본 실험장치에서의 최적의 촉매 주입량으로 0.3 g/l을 사용하였다. $t=25$ min에서 광촉매의 광분해율은 거의 100%인 것을 보이고 있다. 초기 페놀의 농도에 따른 페놀의 광분해 속도상수를 계산하기 위해 $\ln(C_{A0}/C_A)$ 를 시간에 따라 Fig. 10에 나타냈다. $\ln(C_{A0}/C_A)$ -vs-시간 함수가 1차 함수로 나타나고 있어서 본 연구에서 페놀의 광분해 반응이 페놀 농도에 대해서 1차 반응임을 알 수 있었고 본 실험의 기준 조건에서 반응 속도 상수(k)가 평균값으로 약 0.247 min^{-1} 로 나타났다.

3-2-2. O_2 공급 양에 따른 페놀 광분해 영향

Fig. 11에는 O_2 공급 유량 변화에 따른 페놀의 농도 변화를 시간에 따라 나타냈다. 본 실험에서 O_2 를 공급하지 않고($Q_{\text{O}_2}=0 \text{ ml/min}$) TiO_2 만 주입한 후 UV를 조사한 경우 30분 후에 페놀의 농도 변화가 약 1%로

나타나 O_2 가 공급되지 않으면 광촉매 반응이 거의 일어나지 않음을 알 수 있었다. TiO_2 광촉매 반응에서 O_2 는 UV 조사에 의해 TiO_2 광촉매에 여기된 conduction band의 전자와 valance band의 electron hole과 반응하여 O_2 와 HO_2 라디칼을 형성하며 이들이 광촉매 반응에 참여하는

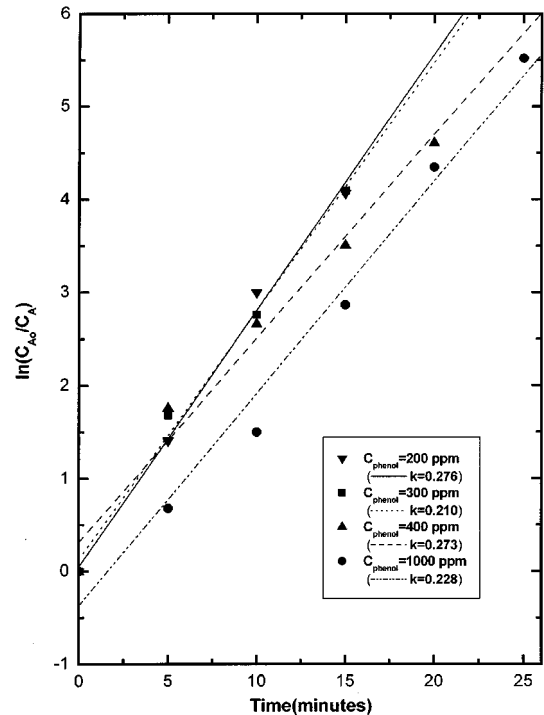


Fig. 10. Reaction rate constants of phenol photo-degradation reaction for various initial phenol concentrations($A_{\text{TiO}_2}=0.3 \text{ g/l}$, $Q_{\text{O}_2}=50 \text{ ml/min}$, $d_{\text{TiO}_2}=122.6 \text{ nm}$).

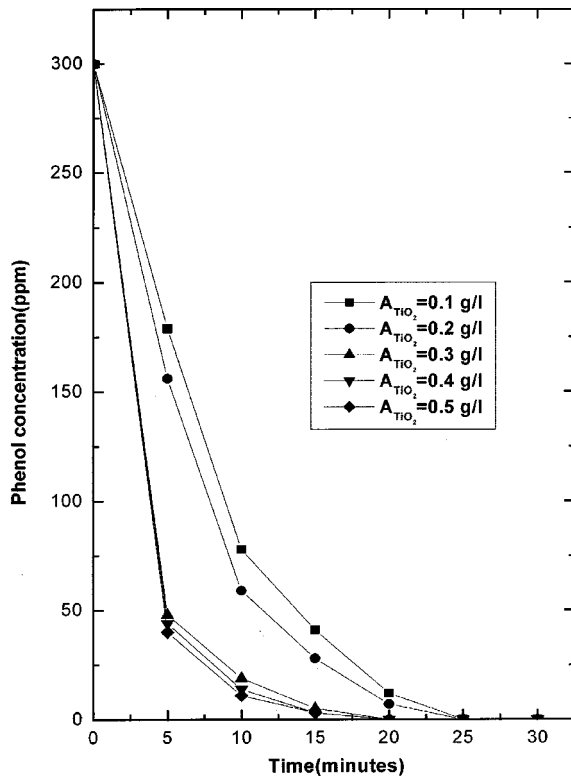


Fig. 9. Effects of TiO_2 amount on phenol degradation($Q_{\text{O}_2}=50 \text{ ml/min}$, $C_{\text{phenol},0}=300 \text{ ppm}$, $d_{\text{TiO}_2}=122.6 \text{ nm}$).

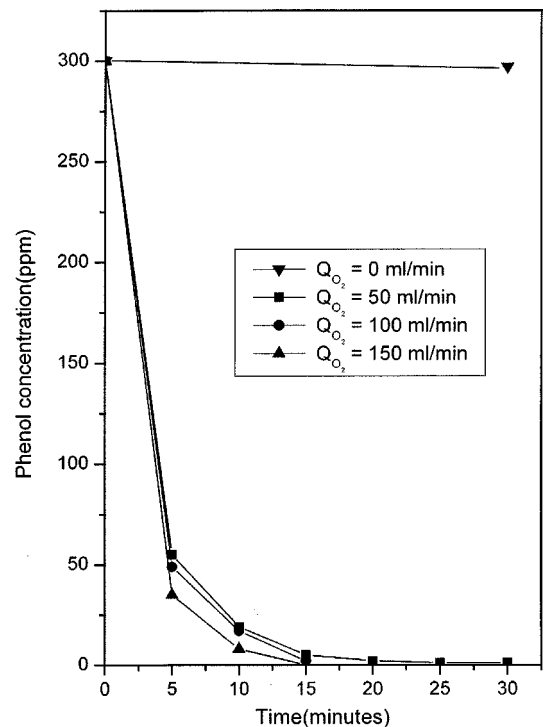


Fig. 11. Effects of O_2 bubbling flow rate on phenol degradation($A_{\text{TiO}_2}=0.3 \text{ g/l}$, $C_{\text{phenol},0}=300 \text{ ppm}$, $d_{\text{TiO}_2}=122.6 \text{ nm}$).

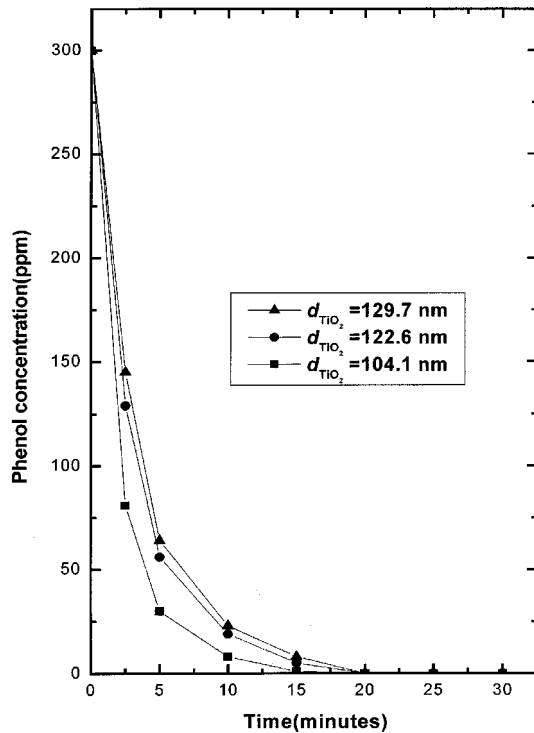


Fig. 12. Effects of TiO₂ average particle size on phenol degradation ($A_{TiO_2}=0.3$ g/l, $C_{phenol,0}=300$ ppm, $Q_{O_2}=50$ ml/min).

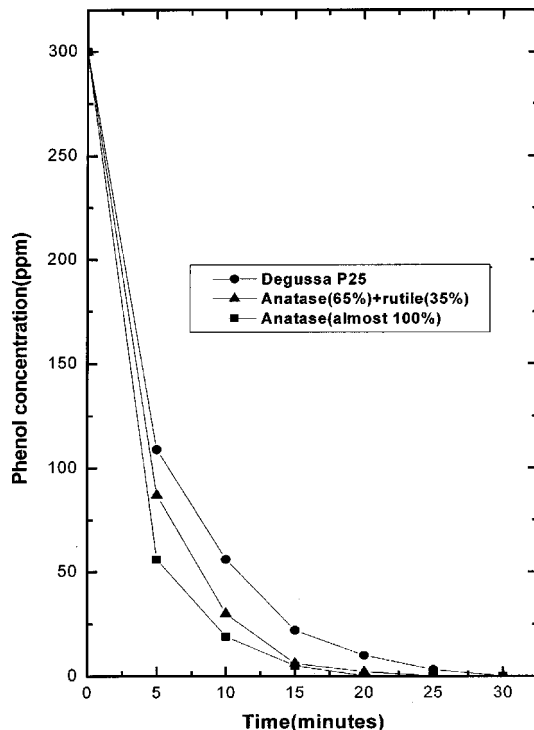


Fig. 13. Effects of anatase/rutile phase ratio of TiO₂ particles on phenol degradation ($A_{TiO_2}=0.3$ g/l, $C_{phenol,0}=300$ ppm, $Q_{O_2}=50$ ml/min, $d_{TiO_2}=122.6$ nm).

것으로 알려져 있다. 따라서 O₂ 공급 유량이 증가함에 따라 TiO₂ 광촉매의 활성이 증가하여 폐놀의 제거 속도가 증가하고 있다. O₂ 유량이 50 ml/min 이상에서는 물속에 O₂ 공급량이 이미 충분하여 O₂ 공급량이

증가하여도 폐놀 제거 효율이 크게 증가하지 않는 것을 보이고 있다. O₂ 공급 유량이 50 ml/min에서 시간이 20 min 경과했을 때 거의 100% 폐놀 제거되었으며 본 실험에서는 O₂의 공급유량을 50 ml/min으로 고정시켰다.

3-2-3. TiO₂ 입자 크기에 따른 광분해 영향

Fig. 12에서는 TiO₂ 광촉매의 평균 입자 크기에 따른 폐놀의 농도 변화를 시간에 따라 나타냈다. TiO₂ 입자의 크기가 129.7 nm에서 104.1 nm로 감소함에 따라 TiO₂ 입자의 비표면적이 증가하므로 광촉매 표면에서의 광분해 속도가 증가하여 폐놀의 농도가 더욱 빨리 감소함을 알 수 있다.

3-2-4. TiO₂ 결정구조에 따른 광분해 영향

Fig. 13에는 본 실험에서 제조한 대부분이 anatase인 TiO₂와 anatase가 65%인 TiO₂의 폐놀의 광분해율을 Degussa P25(75% anatase TiO₂)의 광분해율과 비교하여 나타냈다. TiO₂의 결정 구조에는 anatase, rutile 및 brookite가 있고 anatase와 rutile 구조를 가지는 TiO₂ 입자들이 광촉매 반응에 주로 사용되고 있다. 일반적으로 anatase 구조를 가지는 광촉매가 우수한 활성을 가지는 것으로 알려져 있으나 오염물질에 따라서 rutile 구조를 포함하는 TiO₂ 입자가 활성이 더 높은 것으로 보고 된 바 있으며 phenol의 경우는 anatase상이 rutile상보다 활성이 더 좋은 것으로 보고 되고 있다[4, 6, 9-11]. 본 실험에서도 anatase가 대부분인 TiO₂ 입자가 폐놀의 광분해에 활성이 가장 좋은 것으로 나타났으며 Degussa P25는 anatase 조성이 75%이지만 평균 입자 크기가 약 3 μ m로서 본 실험에서 제조된 TiO₂(anatase 65%, $d_{TiO_2}=123.7$ nm)보다 비표면적이 작으므로 폐놀의 제거 속도가 느리게 나타나고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 확산형 화염 반응기를 사용하여 연료/산소 공급 유량비, 초기 TiCl₄ 공급 농도, 전체 기체 유량(Q) 등의 공정변수를 변화시켜 가며 TiO₂ 입자를 제조하였고 제조된 TiO₂ 입자들의 물성을 분석하였다. 또한 제조된 TiO₂ 광촉매를 이용하여 폐놀의 광분해 실험을 하였으며 TiO₂ 촉매량, 폐놀 농도, O₂ 공급 유량, TiO₂ 입자의 평균 크기, rutile/anatase 조성비 등의 공정변수 변화가 폐놀의 광분해 속도에 미치는 영향을 분석하였다.

- (1) 연료/산소의 공급 유량비가 증가할수록, 초기 TiCl₄ 공급 농도가 증가할수록, 전체 기체 유량이 감소할수록 TiO₂ 입자의 평균 크기는 증가하였다. 비표면적은 초기 TiCl₄ 공급 농도가 증가함에 따라 감소하였다.
- (2) 전체 기체 유량이 감소에 따라 고온의 화염에서 입자의 체류시간이 증가하여 TiO₂ 입자의 rutile상 조성비가 증가하였다.
- (3) O₂ 공급 유량이 증가할수록, TiO₂ 광촉매의 평균 입자 크기가 감소할수록, anatase상의 조성비가 증가할수록, 폐놀의 광분해 속도는 증가하였다.
- (4) 본 실험에서 사용한 공정 조건에서는 TiO₂ 광촉매를 이용한 폐놀의 광분해 반응이 폐놀 농도에 대하여 1차 반응으로 나타났다.

참고문헌

1. Pratsinis, S. E.: *Ceramic Powder Sci.* **12**, 227(1990).
2. Aghish, K. and Panagiotis, D. C.: *Aerosol Sci. & Technol.*: **32**, 369 (2000).
3. Matteazzi, P., Basset, D., Miani, F. and Caer, G. L.: *Nanostructured Materials*, **2**, 217(1993).
4. Bakers, G. J. and Correia, L. A.: *Ceramic Powder Sci.*, **12**, 191(1990).
5. Anpo, M., Shima, T., Kodama, S. and KuboKawa, Y.: *J. Phys. Chem.*, **16**, 4305(1987).

6. Hung, C.-H. and Marinas, B. L.: *J. Environ. Sci. Technol.*, **31**, 562 (1997).
7. Chae, B.-S. and Kim, K.-S.: *HWAHAK KONGHAK*, **37**, 1(1999).
8. Chae, B.-S. and Kim, K.-S.: *HWAHAK KONGHAK*, **37**, 821(1999).
9. Almquist, C. B. and Biswas, P.: *Chem. Eng. Sci.*, **56**, 3421(2001).
10. Hoffmann, M. R., Martin, S. T., Choi, W. and Bahnemann, D. W.: *Chem. Rev.*, **95**, 69(1995).
11. Akira, F., Kazuhito, H. and Toshiya, W.: “*TiO₂ Photocatalysis: Fundamentals and Applications*,” Bkc, Tokyo(1999).